



**KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH GmbH**

**Zentralabteilung Allgemeine Technologie  
Association EURATOM - KFA**

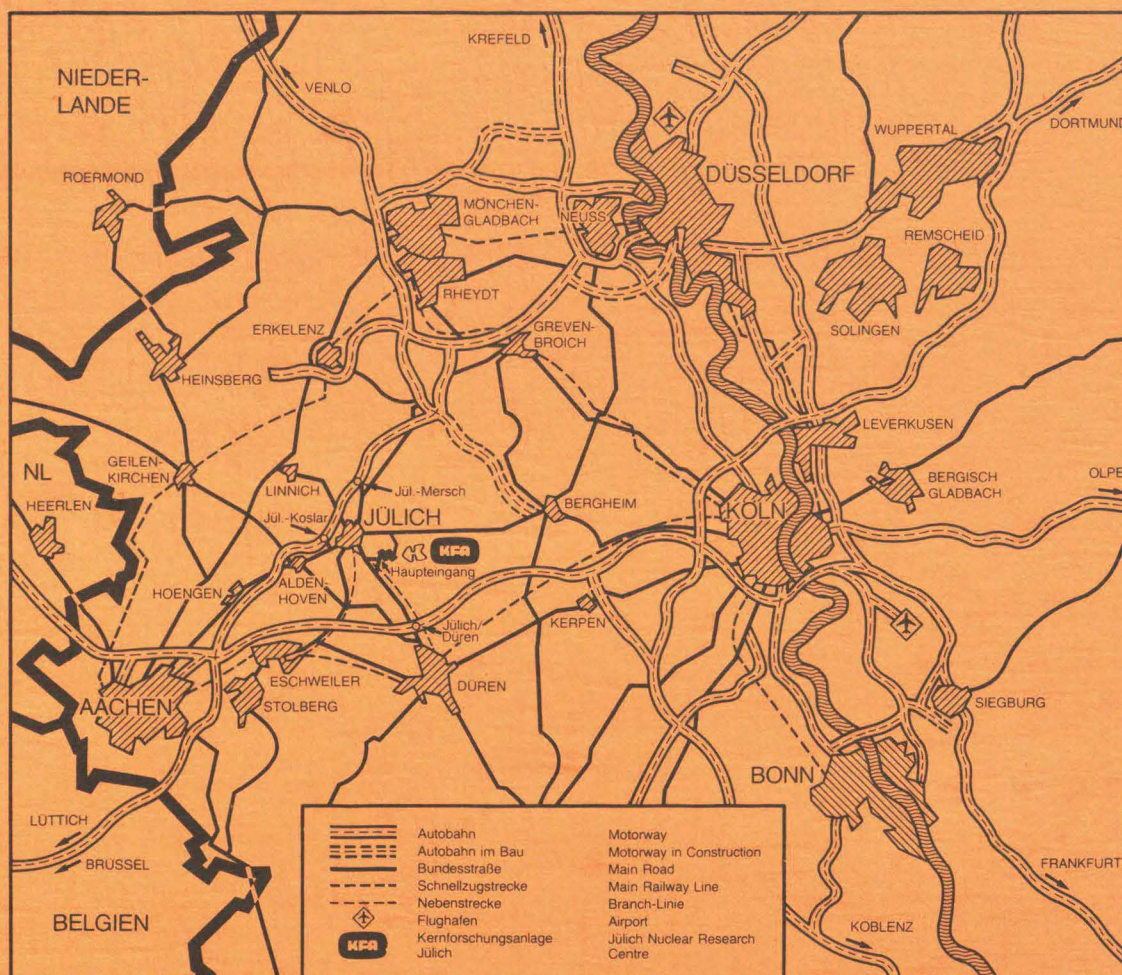
**Fertigung und Test der Metallfaltbälge  
des TEXTOR - Vakuumgefäßes**

von

D. A. Butzek, H. J. Cordewiner, C. Stickelmann,  
H. P. Müller und R. Hemminger

**Jül - Spez - 229  
November 1983  
ISSN 0343-7639**





Als Manuskript gedruckt

## Spezielle Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 229

Zentralabteilung Allgemeine Technologie Association EURATOM-KFA Jül – Spez – 229

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH

Postfach 1913 · D-5170 Jülich (Bundesrepublik Deutschland)

Telefon: 024 61 / 610 · Telex: 833 556-0 kf d

# **Fertigung und Test der Metallfaltbälge des TEXTOR -Vakuumgefäßes**

von

D. A. Butzek<sup>1</sup>, H. J. Cordewiner<sup>1</sup>, C. Stickelmann<sup>2</sup>,  
H. P. Müller<sup>3</sup>, R. Hemminger<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ZAT-KFA-Jülich, Association Euratom-KFA

<sup>2</sup>IPP-KFA-Jülich, Association Euratom-KFA

<sup>3</sup>Witzenmann GmbH, Metallschlauch-Fabrik, Pforzheim

## Kurzfassung

Das als Schweißkonstruktion ausgeführte, torusförmige Vakuumgefäß des Kernfusionsexperimentes TEXTOR besteht aus acht starren Sektionen, die untereinander mit acht metallischen Bälgen des Durchmessers 1300 mm verbunden sind. Die Betriebstemperaturen der Bälge liegen zwischen  $300^{\circ}$  -  $500^{\circ}$  C, dabei treten axiale Auslenkungen von 7 mm und laterale Auslenkungen von 1,5 mm am Balg auf. Die Konstruktion, die Fertigung und insbesondere die Qualitätsprüfungen und Abnahmetests der Bälge werden in diesem Bericht beschrieben.

## Abstract

The vacuum vessel of the TEXTOR - fusion - experiment is an all-welded metal torus consisting of eight rigid sections interconnected by eight metal bellows. The diameter of the bellows is 1300 mm. In operation the temperatures of these bellows are within the range of 300°-500° C.

The heating of the vacuum vessel causes displacements of the bellows of 7 mm (axial) and 1,5 mm (lateral) respectively. Design, manufacturing and especially quality tests and acceptance tests of the metal bellows are described in this report.

## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Beschreibung der Textor-Vakuumgefäßkonstruktion und der Anforderungen an die Gefäßkompensatoren	3
3. Prüfungen und Testprogramm	6
4. Betriebserfahrungen und Zusammenfassung	14
5. Literatur- und Quellenverzeichnis	15
6. Verzeichnis der Tabellen und Abbildungen	17



## 1. E i n l e i t u n g

Zur Erforschung der kontrollierten Kernfusion wurde in der KFA-Jülich in Zusammenarbeit mit Euratom das plasmaphysikalische Experiment TEXTOR (Tokamak Experiment for Technology Oriented Research) errichtet. Eine solche Kernfusionsanlage nach dem Tokamak-Prinzip besteht im wesentlichen aus einem torusförmigen Vakuumgefäß, das von einem System unterschiedlicher Magnetfeldspulen umgeben ist. Das sich im Inneren des Vakuumgefäßes befindliche verdünnte, elektrisch leitende und aufgeheizte Gas, das Plasma, wird von Magnetfeldern eingeschlossen, die durch entsprechende Spulen und das Eigenfeld des ringförmigen Plasmastromes erzeugt werden. Die Funktionsweise eines Tokamaks, die physikalischen Grundlagen sowie die wissenschaftliche Zielsetzung von Fusionsanlagen, insbesondere von TEXTOR, sind ausführlich in (1) behandelt.

Das Vakuumgefäß eines Tokamak muß in seiner toroidalen Richtung einen größeren elektrischen Widerstand besitzen als das Plasma. Diese Forderung wurde beim Textor-Gefäß derart verwirklicht, daß acht Gefäßsektionen mit acht metallischen Bälgen zu einem Torus verbunden wurden. Der elektrische Widerstand des Gefäßes in toroidaler Richtung, hauptsächlich durch die metallischen Bälge bestimmt, liegt bei ca. 4 m $\Omega$ . Als Werkstoff für die Bälge wurde aus Gründen der mechanischen Festigkeit und des elektrischen Widerstandes die Nickelbasislegierung Inconel 625 (Werkst.Nr. 2.4856) ausgewählt. Ein Balg (mit einem Durchmesser von 1300 mm und einer Wanddicke von 0,5 mm), beidseitig mit Balgflanschen (Edelstahl-Werkstoffnr. 1.4311) verschweißt, stellt einen Kompensator dar.

Dichtlippen an den Balgflanschen des Kompensators und entsprechende Dichtlippen am Gefäß, die miteinander verschweißt wurden, sorgten für eine vakuumdichte, temperaturbeständige Verbindung zwischen Kompensatoren und Gefäßsektionen.

Jeder dieser Kompensatoren ist nach der Fertigung einem Heliumlecktest unterzogen worden. Die ursprünglich vorgesehenen umfassenderen Tests konnten wegen Lieferschwierigkeiten des Inconel und Termschwierigkeiten nicht durchgeführt werden. Nachdem das Vakuumgefäß zunächst bei Raumtemperatur ein gutes Dichtigkeitsverhalten zeigte, traten beim ersten Aufheizversuch im Mai 1981 Undichtigkeiten an der konstruktiv und materialtechnisch komplizierten Schweißverbindung zwischen Inconel-Balg und Edelstahlflansch auf. Weitere Aufheiztests des Vakuumgefäßes bis zur vorgesehenen Betriebstemperatur von ca. 350°C erzeugten an 8 von insgesamt 24 Rundschweißnähten der Balg-Flanschverbindung Undichtigkeiten.

Die Gesamtleckrate des Vakuumgefäßes, die danach bei etwa  $10^{-3}$  mbar.l/s lag, ließ zwar einen Plasma-Experimentierbetrieb und den eigentlich für eine spätere Betriebsphase vorgesehenen Test der Energieversorgungssysteme zu, jedoch wurde wegen der begrenzten Reparaturmöglichkeit eine Ersatzbeschaffung der Kompensatoren notwendig.

Die Möglichkeit des Austausches der Kompensatoren wurde bei der Konstruktion des Vakuumgefäßes berücksichtigt, allerdings mußte der Zeitaufwand für diese Prozedur mit mehreren Monaten veranschlagt werden. Für die Ersatzkompensatoren, für die hauptsächlich wegen der schnellen Beschaffungsmöglichkeit (am Lager vorrätig) der hochwarmfeste Edelstahl Werkst.Nr. 1.4948 zum Einsatz kam, wurden deshalb qualitätssichernde Maßnahmen, wie Werkstofftests, Prototyptests und umfangreiche Zwischen- und Abnahmetests während und nach der Fertigung entwickelt, die in diesem Bericht beschrieben werden.



## 2. Beschreibung der Textor - Vakuumgefäßkonstruktion und der Anforderungen an die Gefäßkompensatoren

Die Zielsetzung von TEXTOR, die Untersuchung der Plasma-Wand-Wechselwirkungen und die Anforderungen der Ultrahochvakuumtechnik führten zu einer Arbeitstemperatur des Vakuumgefäßes von ca. 350°C. Es wurde deshalb eine Ganzmetallkonstruktion gewählt, die aus starren Sektionen und metallischen Bälgen besteht (2). Während das torusförmige Plasma einen großen Radius  $R_0 = 1750$  mm und einen kleinen Radius  $a = 500$  mm besitzt, wurde für das torusförmige Gefäß aus Gründen der besseren Beobachtungsmöglichkeit des Plasmas ein großer Radius  $R = 1800$  mm und ein kleiner Radius  $r = 650$  mm gewählt (Fig. 1).

Die als Schweißkonstruktion ausgeführten starren Sektionen wurden aus zylindrischen Segmenten mit einer Wanddicke von 25 mm gefertigt. Als Werkstoff kam der stickstofflegierte Edelstahl Werkst.Nr. 1.4311 nach DIN 17440 (ähnlich AISI 304 L) zum Einsatz. Alle Beobachtungsöffnungen am Gefäß sind mit metallischen Dichtungen versehen (3). Die Gefäßsektionen mit jeweils zwischen den Sektionen eingeschweißten Kompensatoren bilden das torusförmige Vakuumgefäß.

Jeder Kompensator besteht aus dem Balg und den an beiden Seiten des Balges angeschweißten Balgflanschen (Fig. 2 und Fig. 3).

Lippen an Balgflansch und Gefäßflansch, die miteinander verschweißt werden, sorgen für eine vakuumdichte Verbindung zwischen Kompensatoren und Gefäßsektionen. Die Dichtigkeit der Schweißlippenverbindung kann mittels eines Heliumlecktests geprüft werden, indem über eine Prüfbohrung die Ringnut (vgl. Fig. 2, 3 und 7) mit Helium beaufschlagt wird. Die Schweißlippenkonstruktion ermöglicht auch den Austausch eines einzelnen Kompensators durch Trennen und Wiederverschweißen der Schweißlippen.

Im Inneren des Vakuumgefäßes (vgl. Fig. 1) befindet sich der Liner (kleiner Durchmesser 1100 mm), der die erste Wand gegenüber dem Plasma darstellt (2). Zwecks Montage und Demontage des Liners kann das Experiment in einer vertikalen Ebene (Splitting Plane, vgl. Fig. 1) getrennt werden (4). Die beiden Kompensatoren, die in der Trennebene liegen, wurden mit zusätzlichen Zwischenflanschen und Schweißlippen versehen, um die Anzahl der möglichen Trennungen zu erhöhen. Während der Kompensator an der Trennstelle bei der Inconel-Version (Fig. 2) noch aus drei Teilkompensatoren bestand, wurde die später eingesetzte Edelstahl-Version (Fig. 3) nur noch mit zwei Teilkompensatoren ausgerüstet. Der Vorteil besteht darin, daß die Anzahl der Schweißlippen (und der möglichen Trennungen) des Trennebenen-Kompensators erhalten blieb, trotz des Wegfalles von zwei Rundschweißnähten zwischen Balg und Balgflansch.

Während des Aufheizvorganges (5) dehnt sich jede Gefäßsektion an den Gleitlagerstellen der Gefäßabstützung in Richtung der Tangente an den Radius  $R_0 = 1750$  mm aus (siehe Fig. 1).

Die gewählte Art der Gefäßabstützung hat den Vorteil, daß in jedem Querschnitt (durch Gefäß und Plasma) die Achsen von Gefäß und Plasma während des Aufheizvorganges des Gefäßes nicht nennenswert voneinander abweichen. Aufgrund der unterschiedlichen Abmessungen der Sektionen in toroidaler Richtung wandern jedoch bei einer Temperaturerhöhung (vgl. Fig. 1) von  $20^\circ$  auf  $350^\circ\text{C}$  die Endebenen zweier benachbarter Gefäßsektionen um  $\delta = 7$  mm (axiale Balgbewegung) aufeinander zu und die Achsen zweier benachbarter Sektionsenden bilden einen Abstand von  $\lambda = 1,5$  mm (laterale Balgbewegung). Neben ihrer Funktion als elektrische Widerstände müssen die Bälge diese Dehnungen aufnehmen.

Bei der maximal möglichen Temperatur des Liners (6) von  $600^\circ\text{C}$  und einer Vakuumgefäßtemperatur von  $350^\circ\text{C}$  ergibt sich in der Balgmittelebene (vgl. Fig. 2 und Fig. 3) jedes Kompensators eine Aufheizung auf ca.  $500^\circ\text{C}$ .

Es treten somit im Balg selbst, in der Schweißverbindung des Balges mit dem Balgflansch und im Bereich der Lippenschweißung zwischen Balgflansch und Gefäßflansch zum Teil erhebliche Temperaturgradienten auf.

Im Zusammenhang mit den hier beschriebenen Kompensatortests wurde auch der Einfluß des Temperaturgradienten auf das Verhalten der Lippenschweißung untersucht (7).

Mechanisch beansprucht wird jeder Kompensator durch folgende Kräfte:

- a) Äußerer Luftdruck von 1bar und Vakuum im Balginnenraum;
- b) Reaktionskräfte infolge der o.g. Auslenkungen und der Balg-Federsteifigkeiten;
- c) Radial von außen, in der horizontalen Ebene von Textor und in der Balgmittelebene wirkende Kräfte infolge der wirkenden Magnetfelder und der Stromrichtung im Balg.

Vergleichende Berechnungen zeigten, daß die zuletzt unter c) genannten Kräfte nur unwesentlich an der Gesamtbeanspruchung des Kompensators beteiligt sind. Ihr Einfluß auf die Prüf- und Testabläufe konnte deshalb vernachlässigt werden.

Bei der Auswahl der neu zu fertigenden Kompensatoren sollte, wenn möglich, aus Termin- und Kostengründen eine Sonderkonstruktion vermieden werden. Der serienmäßige Balgtyp 550105 der Fa. Witzenmann GmbH (8) konnte die gestellten Anforderungen sehr gut erfüllen. Die Tab. 1 zeigt die Einsatzbedingungen und die technischen Daten für die verschiedenen Einbaufälle.

### 3. P r ü f u n g e n u n d T e s t p r o g r a m m

Grundgedanken bei der Vorgehensweise zur Beschaffung der Ersatzkompensatoren waren:

Minimierung technischer Risiken,

Geringe Lieferzeit des Balgwerkstoffes,

Systematische Untersuchung möglicher Fehlerursachen,

Reparaturfreundliche Gestaltung der Schweißverbindung zwischen Balg und Balgflansch (Zugang von der Innenseite wie bei der Lippenverschweißung)

Tests unter möglichst betriebsnahen Bedingungen an einem "Prototyp" und allen im Vakuumgefäß einzubauenden "Serienkompensatoren".

Da das Verhalten von Nickelbasislegierungen bei plastischer Formgebung und beim Schweißen von Bälgen (9), (10) nicht ganz unproblematisch ist, wurde als Werkstoff für den Balg (vgl. Fig. 3 u. Tab. 1) der hochwarmfeste austenitische Edelstahl 1.4948 ausgewählt, der am Lager vorrätig war. Die Festigkeitsberechnungen (8) zeigten, daß der Balgwerkstoff allen Anforderungen gerecht werden konnte, lediglich geringe Einbußen der plasmaphysikalischen Parameter von TEXTOR infolge des geringeren elektrischen Widerstandes des Edelstahles gegenüber dem Inconel mußten in Kauf genommen werden. Unter Berücksichtigung der o.g. Kriterien wurde die in Fig. 3 ersichtliche WIG-Schweißverbindung zwischen Balg und Balgflansch ausgeführt.



Ein von Prof. Dr. Berns (11) durchgeführtes Werkstoffgutachten, das besonders die Gesichtspunkte Werkstoffkombination, Schweißnahtgestaltung, Heißrißneigung, Verformungsmartensitbildung, Warmversprödung, sowie Korrosion und Langzeitverhalten untersuchte, führte zu einer positiven Beurteilung der Werkstoffe und der Schweißverbindung. Zur praktischen Beurteilung der Schweißverbindung wurden verschiedene Arbeitsproben angefertigt:

- a) Mischverbindung der Werkstoffe 1.4948 und 1.4311 mittels Y-Naht mit dem Zusatzwerkstoff X6CrNi1811IG, entsprechend Fig. 4a, als sog. interne Verfahrensprüfung in Anlehnung an das Regelwerk AD-HP 2/1 Pkt. 4 mit folgenden Prüfungen:

Durchstrahlungsprüfung	nach DIN 54111
Oberflächenrißprüfung	
Zugproben	nach DIN 50120
Faltproben	nach DIN 50121
Kerbschlagbiegeversuche	nach DIN 50122 mit
unterschiedlicher Kerblage	
in der Schweißnaht	
Makro- und Mikroschliffe	

- b) Verbindungsnaht zwischen Balg und Flansch, wobei das Flanschteil aus 1.4311 einmal simuliert wurde durch ein 20 mm dickes (Fig. 4b) und zum anderen durch ein 3 mm dickes Blech (Fig. 4c). Als Prüfungen wurden hier durchgeführt:

Oberflächenrißprüfung  
Makro- und Mikroschliffe  
Aufbrechproben  
Zugproben

Fig. 5 zeigt die Zugproben und Fig. 6 die Aufbrechproben der Balg-Flansch-Verbindung.

Nach den zuvor beschriebenen werkstoff- und schweißtechnischen Untersuchungen und der Festlegung der einzelnen Prüfschritte während des Kompensatorfertigungsprozesses konzentrierte sich das Hauptinteresse auf die Erstellung eines Endabnahmetestprogrammes für die Kompensatoren nach Abschluß des Fertigungsprozesses.

Relativ schnell bestand Einigkeit darüber, einen Prototypkompensator unter verschärften Bedingungen zu testen und erst nach erfolgreich bestandenem Test die Fertigung der übrigen, zum Einsatz kommenden Kompensatoren freizugeben. Jeder Einbaukompensator sollte dann nach weniger scharfen Bedingungen getestet werden. Eine Studie (12) zeigte, daß der Wunsch alle Einsatzbedingungen (vgl. Tab. 1), wie Druck, Temperatur, Temperatur-Gradienten, Bewegungen und daraus resultierende mechanische Belastungen zeitlich parallel zu simulieren, zu einem zeitlichen, finanziellen und personellen Aufwand geführt hätte, der über den Rahmen des Möglichen hinausgegangen wäre.

Für ein mit vertretbarem Aufwand realisierbares Testprogramm ging man von den folgenden Tatsachen und Überlegungen aus:

- a) Alle Schäden an den Inconelbälgen traten bei niedrigen Temperaturen ( $80^{\circ}\text{--}120^{\circ}\text{C}$ ) und geringen Balgauslenkungen auf. Mit relativ hoher Wahrscheinlichkeit sind deshalb nur Temperatureinflüsse Ursache der Schäden gewesen. Ein Heiztest zur Erzeugung von Temperatur-Zyklen und Temperatur-Gradienten sollte deshalb durchgeführt werden.
- b) Die größte mechanische Beanspruchung des Balges tritt bei Kombination der lateralen Auslenkung  $\lambda$  mit dem äußeren Luftdruck auf. Eine Prüfeinrichtung, die diese Beanspruchung bei Raumtemperatur erzeugt, ist leicht herzustellen. Den Einfluß der Temperatur versuchte man derart zu berücksichtigen, daß die laterale Auslenkung  $\lambda$  bei Raumtemperatur entsprechend vergrößert wurde, so daß das gleiche Beanspruchungsverhältnis wie beim  $500^{\circ}\text{C}$  warmen Kompensator gegeben ist, d.h.

$$\lambda_{20^{\circ}\text{C}} = \frac{R_{p0,2} (20^{\circ}\text{C})}{R_{p0,2} (500^{\circ}\text{C})} \cdot \lambda_{500^{\circ}\text{C}} = 3,2 \text{ mm}$$

$$\text{mit } R_{p0,2} (20^{\circ}\text{C}) = 190 \text{ N/mm}^2$$

$$R_{p0,2} (500^{\circ}\text{C}) = 90 \text{ N/mm}^2$$

für 1.4948

$$\lambda_{500^{\circ}\text{C}} = 1,5 \text{ mm (vgl. Tab. 1)}$$

Die mit den obigen Annahmen gewonnene Auslenkung von 3,2 mm führt zu einer extrem hohen Beanspruchung des Kompensators. Üblicherweise wird der Temperatureinfluß in einer gemäßigten Standardauslegung folgender Art berücksichtigt:

$$\lambda_{20^{\circ}\text{C}}^* = \frac{E_{20^{\circ}\text{C}}}{E_{500^{\circ}\text{C}}} \cdot \lambda_{500^{\circ}\text{C}} = 1,9 \text{ mm}$$

$$\text{mit } E_{20^{\circ}\text{C}} = 198 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{500^{\circ}\text{C}} = 158 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$$

$$\lambda_{500^{\circ}\text{C}} = 1,5 \text{ mm}$$

Das bedeutet, daß zwischen der gewählten Auslegung und der Standardauslegung ein Sicherheitsfaktor

$$s = \frac{\lambda_{20^{\circ}\text{C}}}{\lambda_{20^{\circ}\text{C}}^*} = 1,7 \text{ existiert.}$$

Das Testprogramm für die gefertigten Kompensatoren sollte dann durch eine sinnvolle Kombination der o.g. Heiz- und mechanischen Tests mit Heliumlecktests (zur Erkennung von Schäden) erstellt werden.

Für den Prototypkompensator und die Einbaukompensatoren kam das gleiche Testprogramm zur Anwendung, allerdings wurde zur Absenkung des Restrisikos der Prototypkompensator mit erhöhten Temperaturen, Temperaturzyklen und mechanischen Zyklen getestet.

Die einzelnen Schritte während und nach der Fertigung wurden in einem Prüfplan und Testprogramm (PTP), Tab. 2, zusammengefaßt und werden in der Folge beschrieben. Die Punkte Nr. 1-12 umfassen darin die fertigungsbegleitenden Prüfungen, an die sich mit Nr. 13-22 die Endabnahmetests anschließen.

In den Schritten Nr. 1 und Nr. 2 des Prüfplans und Testprogrammes wird die Qualität der verwendeten Werkstoffe sichergestellt, während unter Nr. 3 die Eignungsprüfung des zum Zylinder verschweißten Bleches für den folgenden Formungsprozeß des Balges stattfindet.

Die Formgebung mittels Rollen führt zu unterschiedlichen, in gewissen Toleranzen liegenden, Durchmessern von Balgbord zu Balgwelle. Die Maßkontrolle des Balges sowie die Sichtkontrolle der verformten Längsschweißnaht wird im Schritt Nr. 4 durchgeführt. Unter Nr. 5 bis Nr. 8 werden die Balgborde durch Stirnringe verstärkt und zum Einschweißen in die Balgflansche vorbereitet (vgl. Fig. 3).

Vor dem endgültigen Verschweißen der beiden Flansche mit dem Balg im Schritt Nr. 10 muß unter Nr. 9 sichergestellt werden, daß die Lochachsen der beiden Flansche zueinander richtig positioniert sind.

Nach Abschluß der Fertigung erfolgt im Schritt Nr. 11 eine Sichtprüfung auf eventuelle Schäden und das Vermessen der kompletten Kompensatoreinheit.



Die Beseitigung der restlichen vom Fertigungsprozeß herrührenden Verunreinigungen mittels Frigen und Wischtüchern im Schritt Nr.12 dient gleichzeitig als Vorbereitung für den unter Nr. 13 aufgeführten Dichtheitstest.

Für den Heliumlecktest (PTP-Nr.13) wird der Kompensator an jeder Seite mit einer Prüfplatte verschlossen, wobei eine Prüfplatte einen Abpumpstutzen enthält. Stützstempel zwischen den beiden Prüfplatten nehmen die aus dem Unterdruck des Innenraumes resultierenden Reaktionskräfte auf. Wie aus Fig. 7 ersichtlich, erfolgt die Abdichtung durch die in den Nuten der Prüfplatte liegenden Elastomer-O-Ringe und entsprechende Dichtflächen am Balgflansch. Das Anbringen von zwei konzentrischen Nuten pro Prüfplatte ermöglicht neben der Dichtigkeitsprüfung des Kompensators auch das Auffinden eines eventuellen Lecks im Balgflansch selbst. Zum Vorevakuieren wurde ein Feinvakuum-Pumpstand, bestehend aus einer Wälzkolbenpumpe mit vorgeschalteter Drehschieberpumpe, eingesetzt. Den Lecktest übernahm ein Heliumlecksuchgerät, Fabrikat Leybold-Heraeus, Typ Ultratest F. Durch eine entsprechende Anordnung und Schaltung von Ventilen konnte entweder der Feinvakuum-Pumpstand oder das Heliumlecksuchgerät an den Kompensator angeschlossen werden.

Die Überprüfung des Heliumlecksuchgerätes mit Hilfe zweier Eichlecks (Leckraten:  $L = 1,3 \cdot 10^{-7} \text{ mbar.l/s}$  und  $L = 2,75 \cdot 10^{-8} \text{ mbar.l/s}$ ), die in der Nähe des Abpumpstutzens des Lecksuchers angebracht waren, erfolgte vor und nach jedem Lecktest des Kompensators. Die maximale Empfindlichkeit des verwendeten Lecksuchgerätes lag bei  $2 \cdot 10^{-11} \text{ mbar.l/s}$ . Zur Ermittlung von örtlichen Leckagen und Montagefehlern wurden bei einer lokalen Lecksuche die kritischen Zonen (Schweißnähte und O-Ringe) mit der Heliumsprühpistole angeblasen. Nach positivem Ergebnis schließt sich ein integraler Lecktest an, bei dem der Kompensator zwischen den beiden Balgflanschen von außen mit Folie abgeklebt wird. Der entstandene Zwischenraum wurde während der 15 min andauernden Meßzeit mit Helium beaufschlagt. Vor Beginn des integralen Lecktestes mußte der Untergrund, resultierend aus der Oberflächenabgasung, deutlich niedriger sein (ca.eine Zehnerpotenz), als die geforderte Leckrate ( $L = 10^{-8} \text{ mbar.l/s}$ ).

Fig. 8 zeigt die Einrichtung für den Heliumlecktest.

Erst nach erfolgreich abgeschlossenem Dichtigkeitstest (PTP-Nr. 13) wurde der Kompensator den weiteren Testschritten unterworfen.

Der mechanische Test, PTP-Nr. 14, konnte mit der gleichen Einrichtung (vgl. Fig. 8) durchgeführt werden, mit der der Dichtigkeitstest vorgenommen wurde.

Bei nicht evakuiertem Kompensatorinnenraum erfährt die obere Prüfplatte mittels eines Hydraulikzylinders eine Auslenkung quer zur Balgachse (laterale Kompensatorauslenkung), während die untere Prüfplatte mit dem Gestell der Prüfeinrichtung fest verbunden ist. Das infolge der Balgfedersteifigkeit auftretende Kippmoment der oberen Prüfplatte wird durch eine von oben auf die obere Prüfplatte wirkende Rolle und die im Kompensatorinnenraum befindlichen Stempel aufgenommen.

Wenn die geforderte laterale Auslenkung erreicht ist, wird der Kompensatorinnenraum auf ca. 10 mbar evakuiert. Anschließende Belüftung des Innenraums und die Rücknahme der lateralen Auslenkung schließen einen mechanischen Belastungszyklus ab.

Der im PTP-Nr. 15 aufgeführte Heliumlecktest gibt Aufschluß darüber, ob im vorangegangenen mechanischen Test Schäden aufgetreten sind.

Aufgrund der bereits erwähnten Vorgeschichte kommt dem Heiztest, PTP-Nr. 16, eine besondere Bedeutung zu. Für den Heiztest wurde jeder Kompensator an den beiden Enden mit beheizbaren Prüfplatten verschraubt. Die Abdichtung zwischen Balgflanschen und Prüfplatten übernahm eine Asbestschnur, der Kompensatorinnenraum wurde während des Heiztests mit Reinstargon (3-10 ltr./min.) gespült. Zur Beheizung der Prüfplatten konnte auf eine am Markt vorhandene Glühanlage "Weldotherm VAS 82 kVA" mit vollautomatischer Programmsteuerung und Temperaturschreiber (13) zurückgegriffen werden, die sich bei den Tests sehr gut bewährt hat.

Jeweils 12 Heizelemente wurden auf eine Prüfplatte aufgebracht. Fig. 9 zeigt den Heiztest-Versuchsaufbau (Heizelemente auf oberer Prüfplatte bei abgedeckter Isolation).

Durch Vorversuche wurde nachgewiesen, daß bei guter Kontaktierung von Balgflansch und Prüfplatte keine nennenswerten Temperaturdifferenzen zwischen diesen beiden Teilen auftreten. Die auf der Prüfplatte zwischen zwei Heizelementen auf dem Balgflanschdurchmesser gemessene Temperatur entsprach recht genau der Balgflanschttemperatur. Weitere Nickel-Chrom-Nickel-Thermoelemente maßen die Temperaturen der Heizelemente (Steuerung der Weldom-therm-Glühanlage) und die Temperaturen am Balg (Fig. 10). Zur Erzeugung eines axialen Temperaturprofils wurde der Balg von einem axialen Strom von ca. 2-4 kA durchflossen. (Die Vorversuche zum axialen Temperaturprofil des Balges werden ausführlich in (7) beschrieben). Die Anschlußklemmen an der oberen und unteren Prüfplatte sind auf Fig. 9 und Fig. 10 zu sehen. Während des Heizvorganges sorgte eine Isolation für geringe Wärmeverluste, zur schnelleren Abkühlung konnte die Isolation abgenommen werden. Den wichtigsten Teil eines Temperaturzyklus (des Prototypkompensators) zeigt der Temperaturschrieb, Fig. 11. Die Temperatur der Heizelemente wurde mit einer Aufheizgeschwindigkeit von  $100^{\circ}\text{C/h}$  bis zu einer Haltetemperatur von  $600^{\circ}\text{C}$  hochgefahren. Die Balgflansch- und Balgtemperatur folgen mit zeitlichen Verzögerungen. Bei Erreichen der gewünschten Balgflanschttemperatur, beim Prototyp  $500^{\circ}\text{C}$ , wurde die Balgheizung (Direktstromheizung) eingeschaltet bis die max. Temperatur von  $550^{\circ}\text{C}$  erreicht wurde. Im Bereich des Balgbordes und der Schweißverbindung zwischen Balgflansch und Balg wurde dabei ein wesentlich größerer axialer Temperaturgradient erzeugt, als im realen Betriebszustand zu erwarten ist. Nach Abschalten aller Heizungen wurde die Isolation entfernt und der Kompensator mit dem Kran ca. 5 cm angehoben, damit auch die untere Prüfplatte abkühlen konnte. (Im Schrieb ist deutlich zu erkennen, daß die Heizelemente der unteren Prüfplatte langsamer abkühlen, da diese auf der unteren Isolation liegen blieben.)

Der dem Heiztest folgende Helium-Lecktest, PTP-Nr. 17, zeigt, ob der Kompensator den Heiztest unbeschadet überstanden hat.

Ein zweiter mechanischer Test, PTP-Nr. 18, mit lateraler Bewegung wie im späteren Betriebszustand, sollte mögliche, vom Heiztest herrührende Schadensursachen aufdecken.

Wenn der Kompensator den abschließenden Heliumlecktest, PTP-Nr. 19, erfolgreich bestanden hat und auch die Maß- und Sichtkontrolle, PTP-Nr. 20, positiv verlaufen ist, konnte der Kompensator zum Einbau freigegeben werden.

Eine gründliche Endreinigung, PTP-Nr. 21, und eine Transportschäden verhindernde Verpackung, PTP-Nr. 22, runden das Prüf- und Testprogramm ab.

#### 4. B e t r i e b s e r f a h r u n g e n u n d Z u s a m m e n f a s s u n g

Nach Montage der neuen Gefäß-Kompensatoren und des im Gefäß liegenden Liners wurde Mitte 1982 der Experimentierbetrieb von TEXTOR wieder aufgenommen. Alle vorgesehenen Betriebszustände, wie beheiztes Vakuumgefäß (ca. 300°C), beheizter Liner (ca. 600°C) und plasmaphysikalischer Betrieb traten während der mehr als einjährigen Betriebsdauer auf, ohne daß eine Beeinträchtigung der Funktionstüchtigkeit der Witzenmann-Kompensatoren zu erkennen gewesen wäre. Obwohl die Kompensatoren nicht unter exakten Betriebsbedingungen getestet wurden, kann aufgrund der Betriebserfahrungen davon ausgegangen werden, daß die gewählte Prüf- und Testprozedur bei vertretbarem Zeit- und Kostenaufwand ein hohes Maß an Qualitätssicherung gebracht hat.



## 5. L i t e r a t u r - u n d Q u e l l e n v e r z e i c h n i s

- (1) G.H. Wolf, H. Conrads; Ein Prüfstand für die Fusionsforschung: TEXTOR, Bild der Wissenschaft, Dez. 1981
- (2) D.A. Butzek, K. Derichs, W. Graf, A. Cosler, K.H. Dippel, M. Schürer, W. Bieger;  
Association EURATOM-KFA-Jülich, Germany;  
VACUUM VESSEL AND PUMPING SYSTEM OF TEXTOR;  
Proceedings of the 10 th Symposium on Fusion Technology,  
Padova, Italy, 1978
- (3) D.A. Butzek; Das Dichtigkeitsverhalten Silberbeschichteter Metalldichtungen im Temperaturbereich 20°-450°C  
Kernforschungsanlage Jülich, JÜL-1500, April 1978
- (4) W. Kohlhaas, M. Schürer, C. Stickelmann;  
Association EURATOM-KFA-Jülich, Germany;  
THE MECHANICAL STRUCTURE OF TEXTOR;  
Proceedings of the 10 th Symposium on Fusion Technology,  
Padova, Italy, 1978
- (5) D.A. Butzek, W. Kohlhaas, J. Vieth;  
Association EURATOM-KFA-Jülich, Germany;  
HEATING AND COOLING SYSTEM FOR THE VACUUM VESSEL OF  
TEXTOR USING AN ORGANIC HEAT TRANSFER FLUID;  
Proceedings of the twelfth Symposium on Fusion Technology,  
Jülich, Germany, Sept. 1982
- (6) B. Bloemer, K.H. Schlimme, D. Butzek, U. Schwarz;  
TU-Braunschweig and Association EURATOM-KFA-Jülich;  
HIGH CURRENT VACUUM BUSHING FOR LINER-HEATING OF  
TEXTOR;  
Proceedings of the twelfth Symposium on Fusion Technology,  
Jülich, Germany, Sept. 1982

- ( 7) H.J. Cordewiner, D. Butzek, M. Dick, W. Scharenberg,  
H.P. Schiffer, C. Stickelmann;  
Experimentelle Untersuchungen an TEXTOR-Faltenbälgen  
(Inconel 625);  
ZAT-Bericht 127-III.1-48; Interner Bericht der Zentral-  
abteilung Allgemeine Technologie der Kernforschungsanlage  
Jülich, Mai 1982
  
- ( 8) Fa. Witzenmann GmbH, Metallschlauch-Fabrik, Pforzheim;  
Östliche Karl-Friedrich Straße 134,  
D-7530 Pforzheim
  
- ( 9) Private Mitteilung;  
J. Citrolo; Princeton Plasma Physic Lab.  
Princeton N.J.; USA
  
- (10) Private Mitteilung;  
Z. Sledziewski; Centre d'Etudes Nucleaires,  
Fontenay-aux-Roses,  
France
  
- (11) H. Berns; Inst. für Werkstoffe - Lehrstuhl Werkstoffe II,  
Ruhr-Universität Bochum;  
Werkstoffgutachten für Metallfaltenbälge TEXTOR
  
- (12) H.J. Cordewiner, H. Haas, W. Bertram;  
Projektstudie TEXTOR-Faltenbalgprüfstand  
Zentralabteilung Allgemeine Technologie der Kernforschungs-  
anlage Jülich; Juni 1981
  
- (13) Weldotherm - Glühanlagen;  
Fa. Weldotherm - Anlagen - Vertrieb, H.P. Frede,  
Kreuzes Kirchstr. 8, 4300 Essen

## 6. V e r z e i c h n i s d e r T a b e l l e n u n d A b b i l d u n g e n

- Tab. 1 Einsatzbedingungen und technische Daten der TEXTOR-  
Gefäßkompensatoren
- Tab. 2 Prüfplan und Testprogramm (PTP) für TEXTOR-Gefäß-  
kompensatoren
- Fig. 1 Aufbau des Vakuumgefäßes TEXTOR
- Fig. 2 TEXTOR-Gefäßkompensatoren aus Inconel
- Fig. 3 TEXTOR-Gefäßkompensatoren aus Edelstahl
- Fig. 4 Schweiß-Arbeitsproben
- Fig. 5 Zugproben Balg-Flansch-Schweißverbindung
- Fig. 6 Aufbrechproben Balg-Flansch-Schweißverbindung
- Fig. 7 Prüfplatte für Heliumlecktest
- Fig. 8 Heliumlecktest und Mechanischer Test
- Fig. 9 Heiztest-Versuchsaufbau  
(obere Isolation abgedeckt)
- Fig.10 Temperaturmessung-Heiztest
- Fig.11 Temperaturzyklus beim Heiztest des Prototypbalges

Tab. 1 Einsatzbedingungen und techn. Daten der TEXTOR-Gefäß-kompensatoren (Typ 550105-Witzenmann GmbH)  
(vgl. Fig. 3)

	Einbaufall I Normalfall (12 wellig)	Einbaufall II Trennstelle (2 x 4 wellig)
Betriebsdruck außen Betriebsdruck innen	1 bar Vakuum	1 bar Vakuum
Max. Betriebstemperatur am Balg	500°C(+50°C)	500°C(+50°C)
Max. Betriebstemp. in der Verbindg. Balg-Flansch	300°C(+50°C)	500°C(+50°C)
Axiale Balgbewegung $\delta$ Laterale Balgbewegung $\lambda$ (beide gleichzeitig auf- tretend bei Gefäßtemp. 350°C)	7 mm 1,5 mm	7 mm 1,5 mm
Federrate für axiale Be- wegung $C_{\delta}$	~ 99N/mm	~ 149N/mm
Federrate für laterale Bewegung $C_{\lambda}$	~ 3810N/mm	~ 3960N/mm
Lastspielzahl N (entspr. Anzahl der Auf- heizzyklen des Gefäßes)	> 9000	> 7000
Balgnennendurchmesser	1300 mm	1300 mm
Balgaußendurchmesser	1372 $\pm$ 3 mm	1372 $\pm$ 3 mm
Balginnendurchmesser	1310 $\pm$ 3 mm	1310 $\pm$ 3 mm
Wellenabstand	22 mm	22 mm
Balg-Wanddicke	1x0,5 mm	1x0,5 mm
Balg-Werkstoff	1.4948	1.4948
Stirnring-Werkstoff	1.4306	1.4306
Flansch-Werkstoff	1.4311	1.4311



Tabelle 2

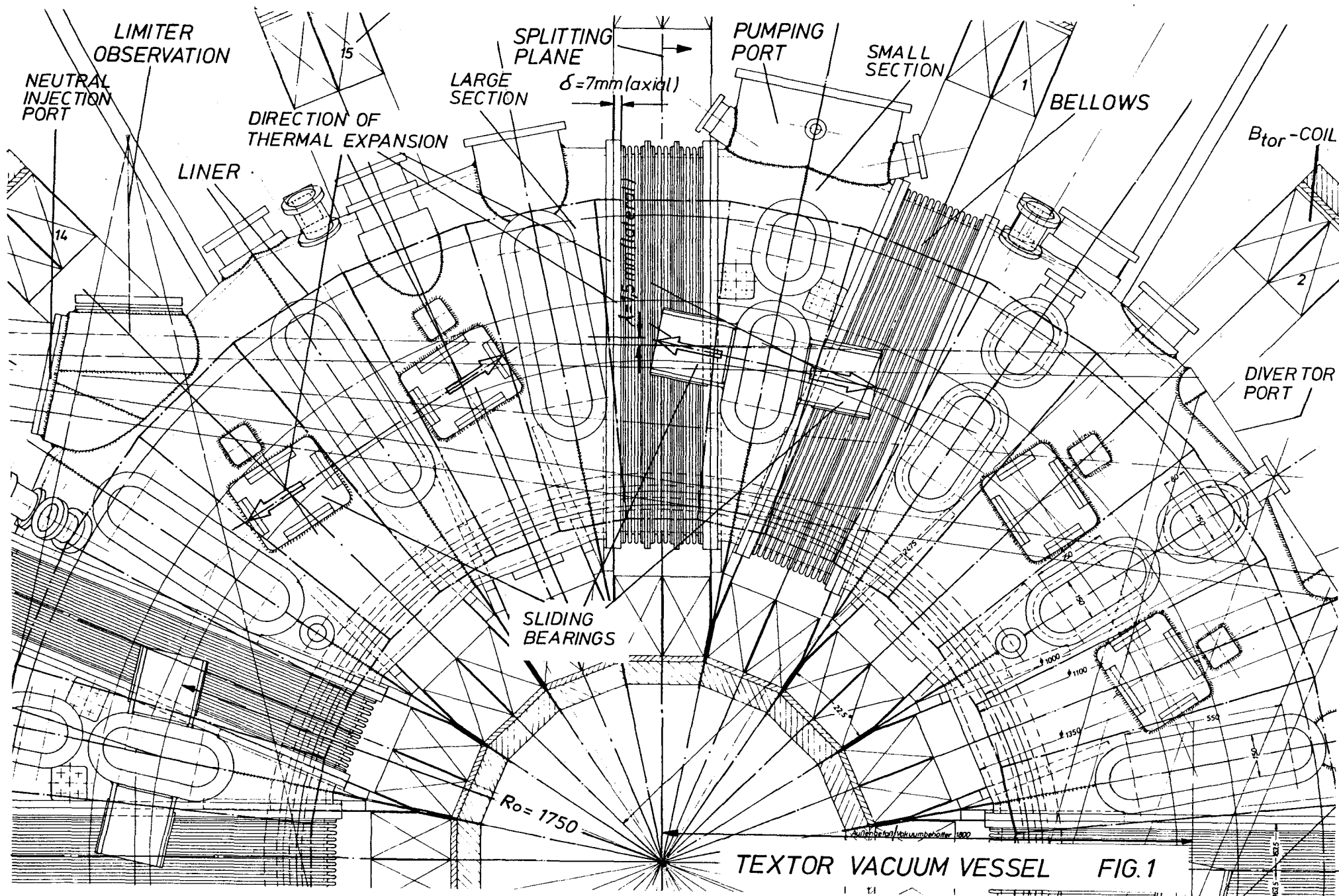
Prüfplan und Testprogramm (PTP)  
für TEXTOR-Gefäßkompensatoren

Fertigungsbegleitende Prüfungen	Nr.	Prüfung oder Test
	1	Prüfung des Balg-Werkstoffes (Abmessungen, Chemische Analyse, Mechanische Eigenschaften) nach DIN 50049-3.1 B
	2	Prüfung des Stirnring-Werkstoffes nach DIN 50049-3.1 B
	3	Visuelle Prüfung der Längsschweißnaht und Maßkontrolle des Blechzylinders vor dem Formen des Balges
	4	Maß- und Sichtkontrolle nach Formen des Balges
	5	Montage der Stirnringe am Balgbord und anschließende Maßkontrolle
	6	Anpassen des Balgflanschdurchmessers zur Aufnahme des Balgbordes
	7	Visuelle Prüfung nach Montage des Balgbords mit dem Balgflansch

Nr.	Prüfung oder Test
Fertigungsbegleitende Prüfungen	8 Kontrolle der Schweißnahtvorbereitung an Balgflansch und Balgbord
	9 Lagekontrolle (Lochkreiseinteilung) der beiden gekennzeichneten Balgflansche zueinander.
	10 Schweißen der Verbindungsnaht zwischen Balgbord und Balgflansch mit Schweißüberwachung
	11 Visuelle Prüfung und Maßkontrolle (Schweißverzüge) der kompletten Balgeinheit
	12 Reinigung
Endabnahmetests	13 Heliumlecktest (Integrale Vakuum-Methode), zul. Leckrate $L \leq 1 \cdot 10^{-8} \text{ mbar} \cdot \text{l/s}$ über eine Meßzeit von 15 min.
	14 Mechanischer Test 5 mechanische Zyklen (Prototypkompensator 10 Zyklen); jeder Zyklus besteht aus: a) lateraler Bewegung $\lambda = 3,2 \text{ mm}$ bei Einbaufall I (entspr. $\lambda = 0,4 \text{ mm}$ für Teilbalg bei Einbaufall II), Bewegungsrichtung senkrecht zur Beweg.-Richt. des späteren Betriebszustandes b) Evakuieren des Komp.-Innenraumes unter Beibehaltung der lateralen Auslenkung bis ca. 10 mbar c) Belüften des Kompensatorinnenraumes d) Rücknahme der lateralen Auslenkung

Nr.	Prüfung oder Test
15	Heliumlecktest entspr. Nr. 13
16	<p>Heiztest</p> <p>5 Temperaturzyklen (Prototypkompensator 10 Zyklen); jeder Zyklus besteht aus:</p> <p>a) Aufheizen der Balgflansche (mit Heizelementen) auf 300°C bei Einbaufall I     (550°C bei Prototyp und Einbaufall II)</p> <p>b) Aufheizen der Balgwellen (mit Direktstromheizung) auf max. Balgtemperatur von 550°-600°C)</p> <p>c) Abkühlung der Balgwellen auf Flanschttemperatur</p> <p>d) Abkühlung der Flansche (u. Balgwellen) auf ca. 50°C</p>
17	Helium-Lecktest entspr. Nr. 13
18	<p>Mechanischer Test entspr. Nr. 14</p> <p>jedoch laterale Bewegungsrichtung wie im späteren Betriebszustand</p>
19	Heliumlecktest entspr. Nr. 13
20	Maß- und Sichtkontrolle des kompletten Kompensators.
21	Endreinigung und Kontrolle der Sauberkeit
22	Verpacken mit Kontrolle der Verpackung und Transport- sicherung.

Endabnahmetests



327

264

Gefäßflansch  
1.4311

Schweißlippen-  
verbindung

Prüfbohrung

Balgflansch  
1.4311

Schweißnaht  
Balg-Balgflansch

Balg  
Inconel 625  
(0,5mm dick)

Balgmittelebene

[illegible]

**Fig. 2**  
**Inconelbalg**  
**mit Flanschen**  
**(Inconel-Kompensator)**

Trennstelle  
(Einbaufall II)

Normalfall  
(Einbaufall I)

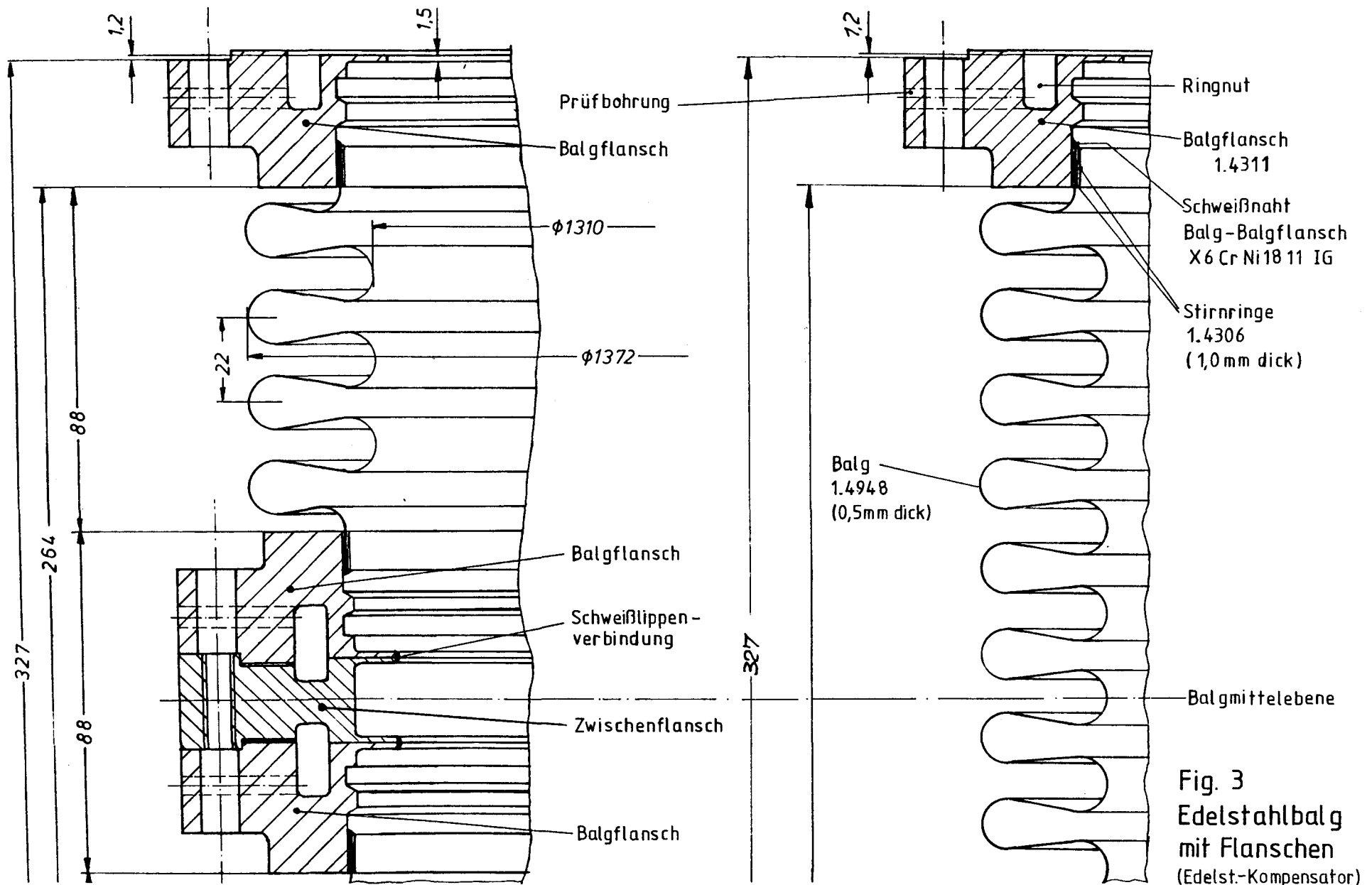


Fig. 3  
Edelstahlbalg  
mit Flanschen  
(Edelst.-Kompensator)

Y -Naht

Fig. 4a

Mischverbindung

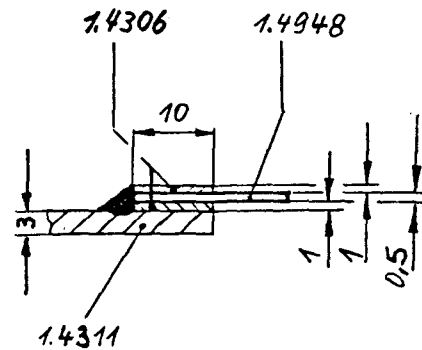
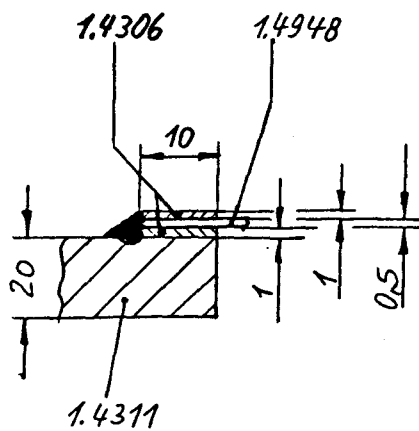
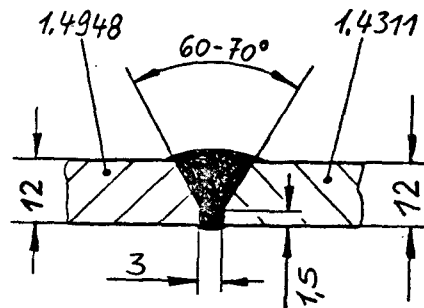


Fig. 4b

Fig. 4c

Verbindungsnaht Balg - Flansch

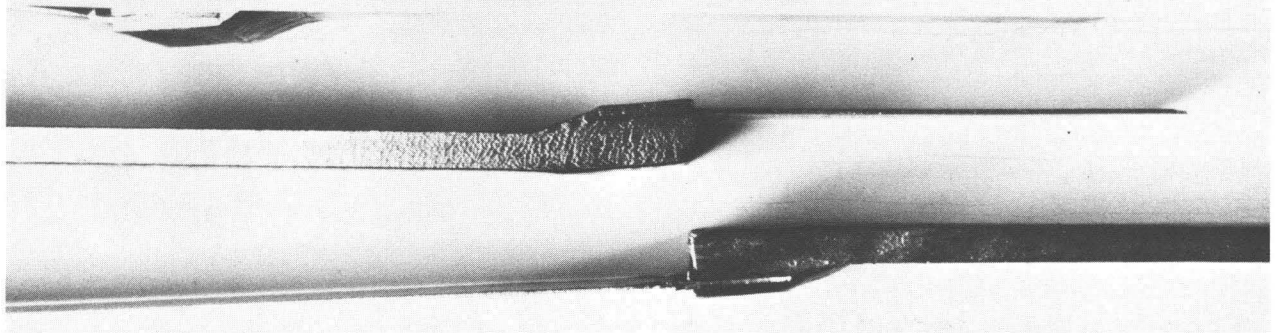
Schweiß - Arbeitsproben

Fig. 4



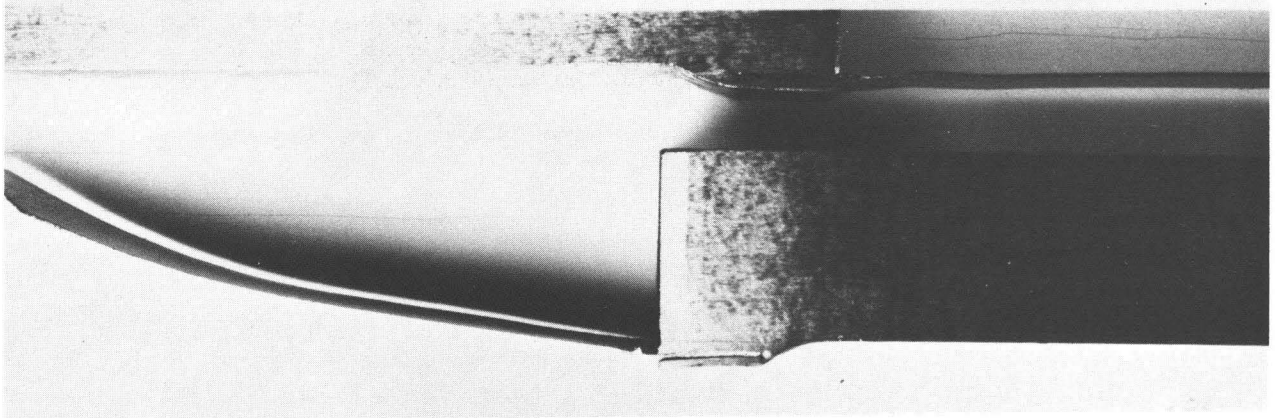
ZUGPROBEN Verbindung Balg - Flansch

*Blech 3 dick*



ZUGPROBEN Verbindung Balg - Flansch

*Blech 20 dick*



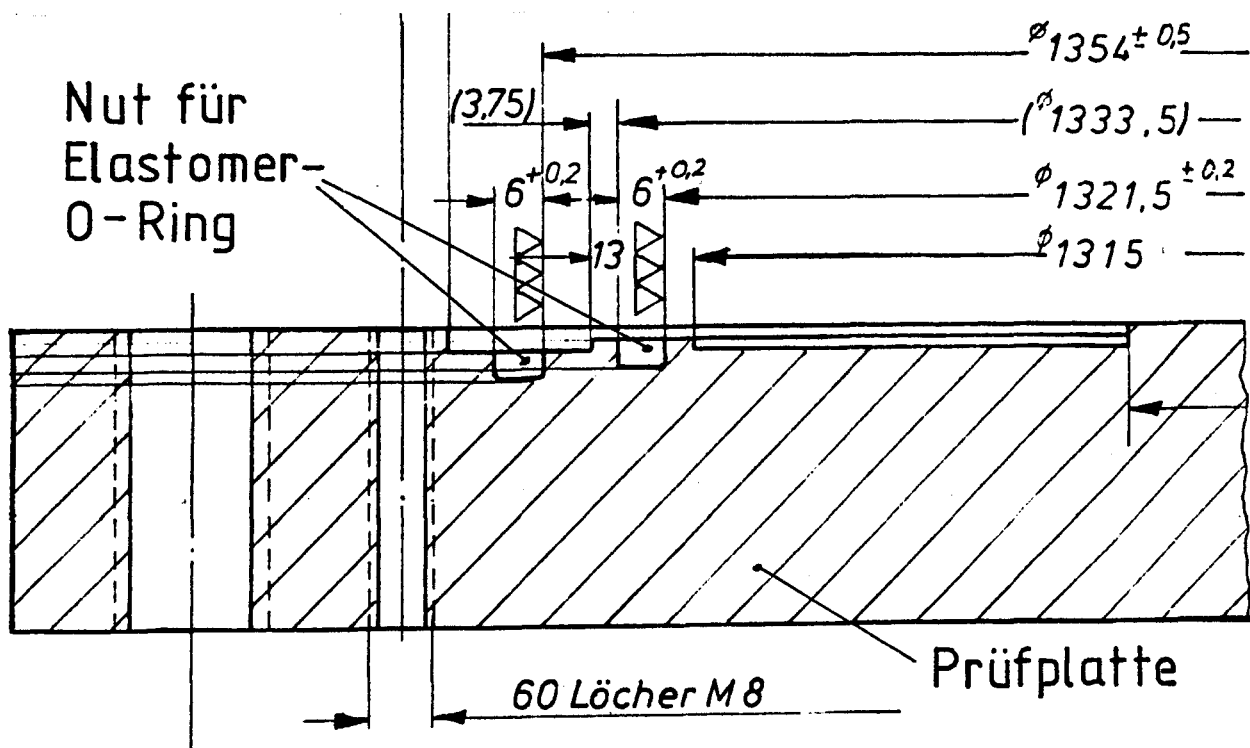
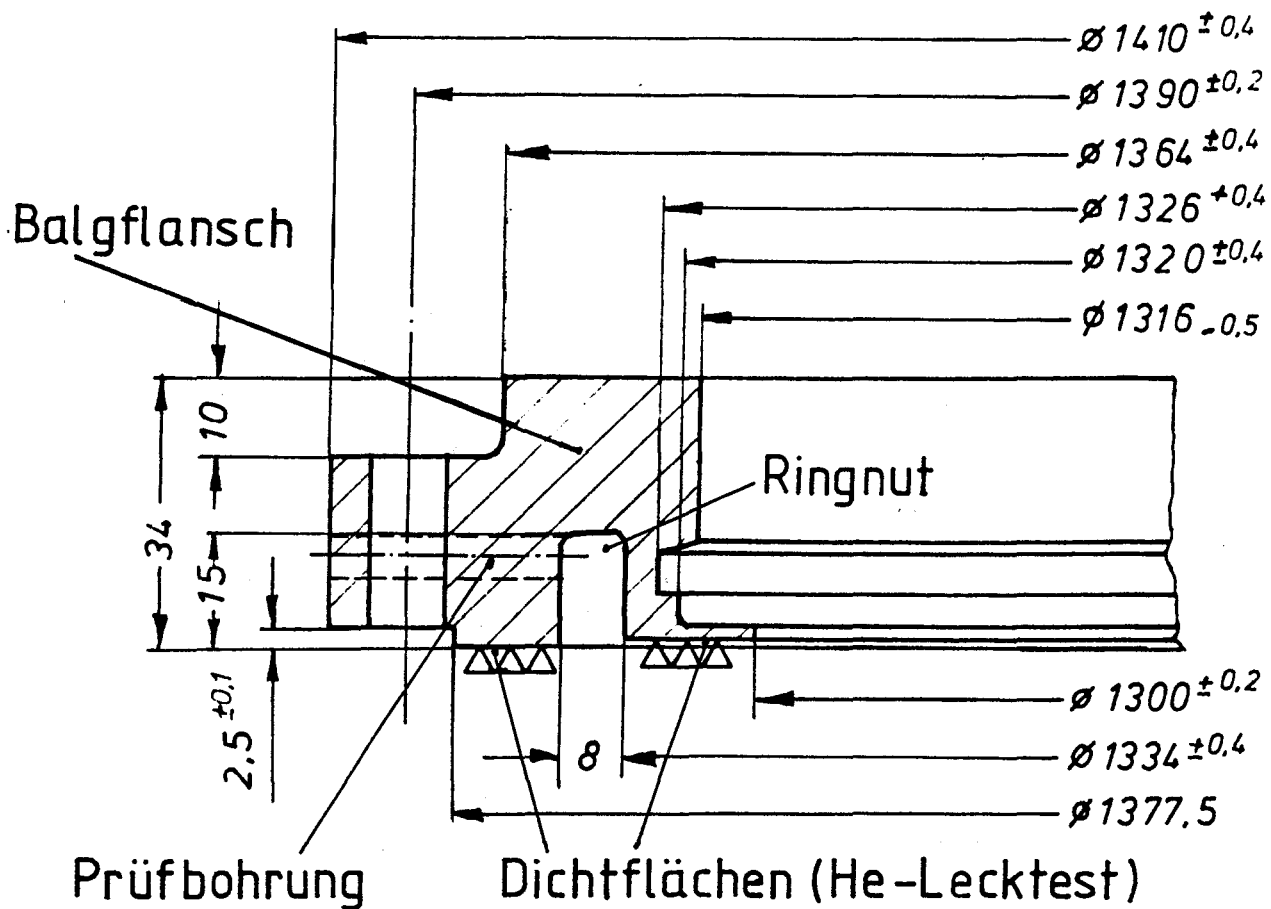
Zugproben  
Balg - Flansch - Schweißverbindung

Fig. 5



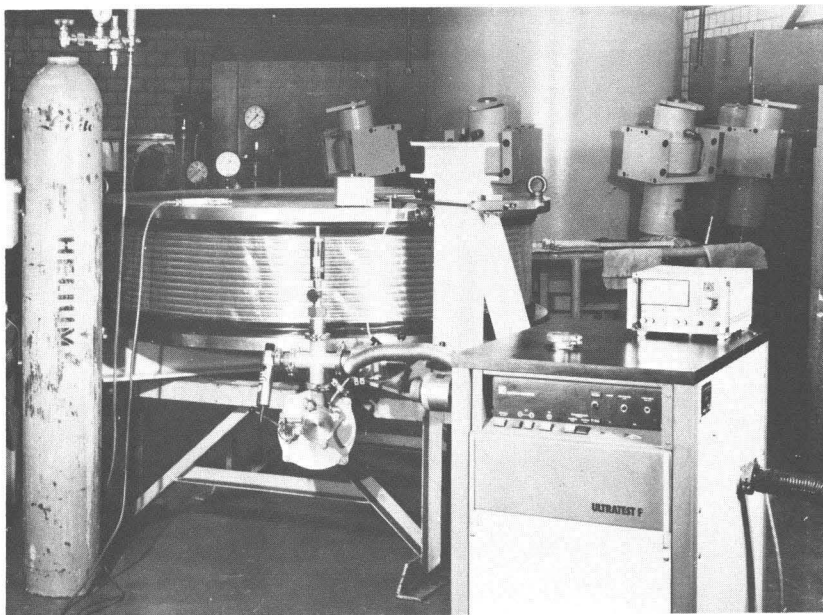
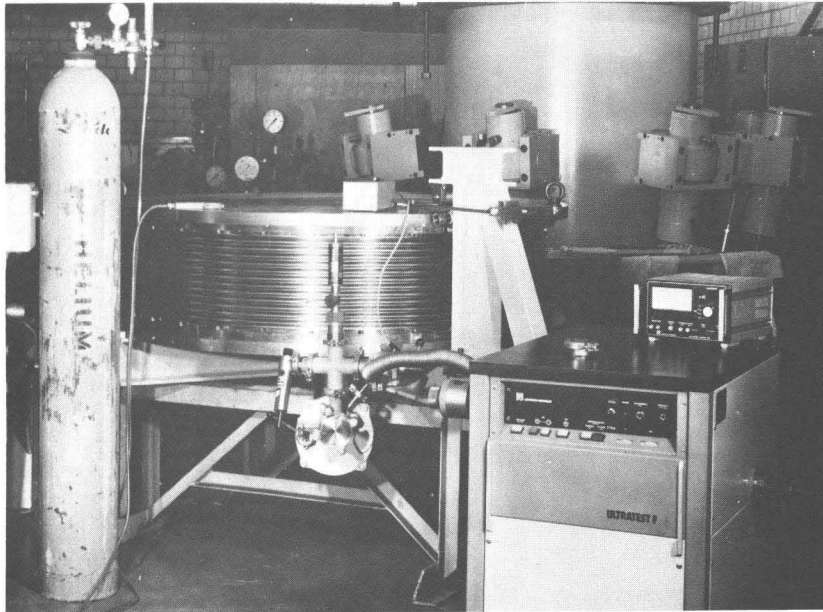
Aufbrechproben  
Balg - Flansch - Schweißverbindung

Fig. 6



Prüfplatte für Heliumlecktest

Fig. 7

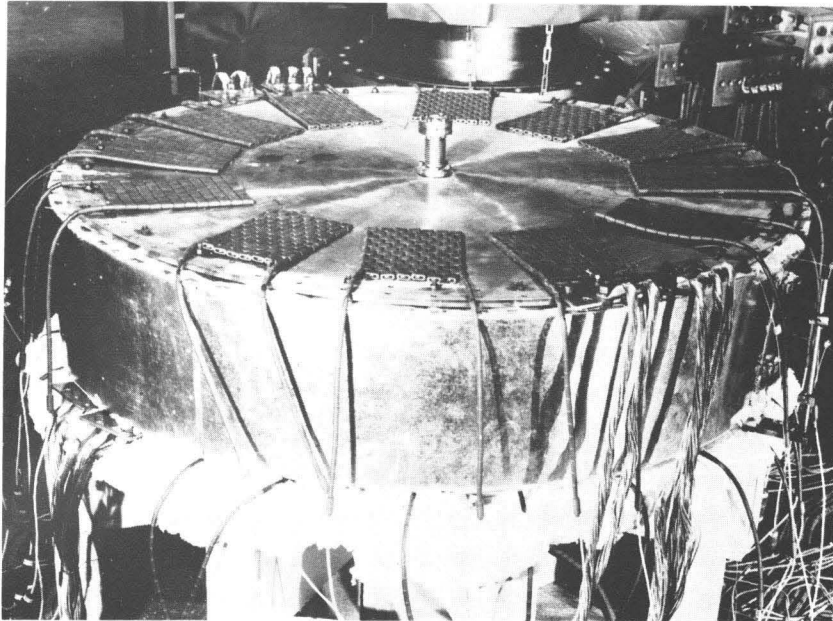


Balg mit Folie  
abgedeckt

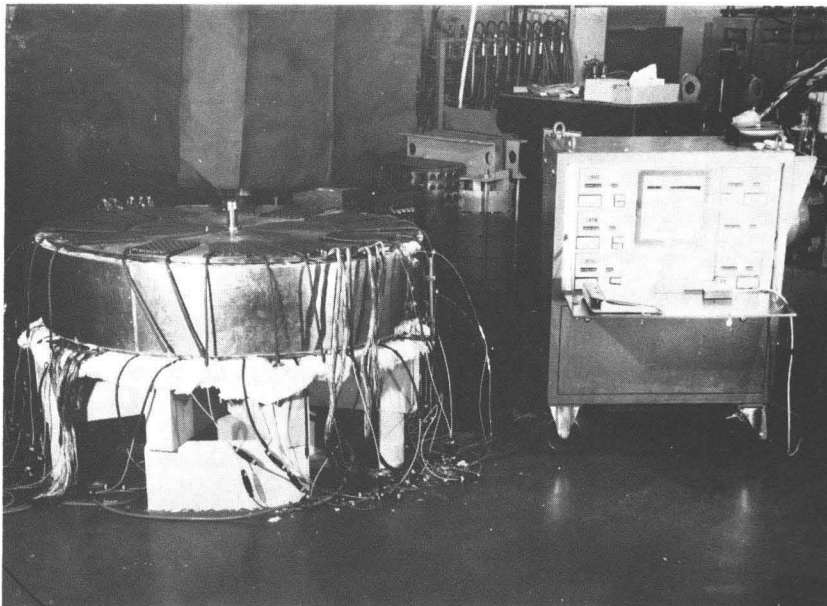
(Werksphoto Fa. Witzenmann GmbH)

Fig. 8

Heliumlecktest u. Mechanischer Test



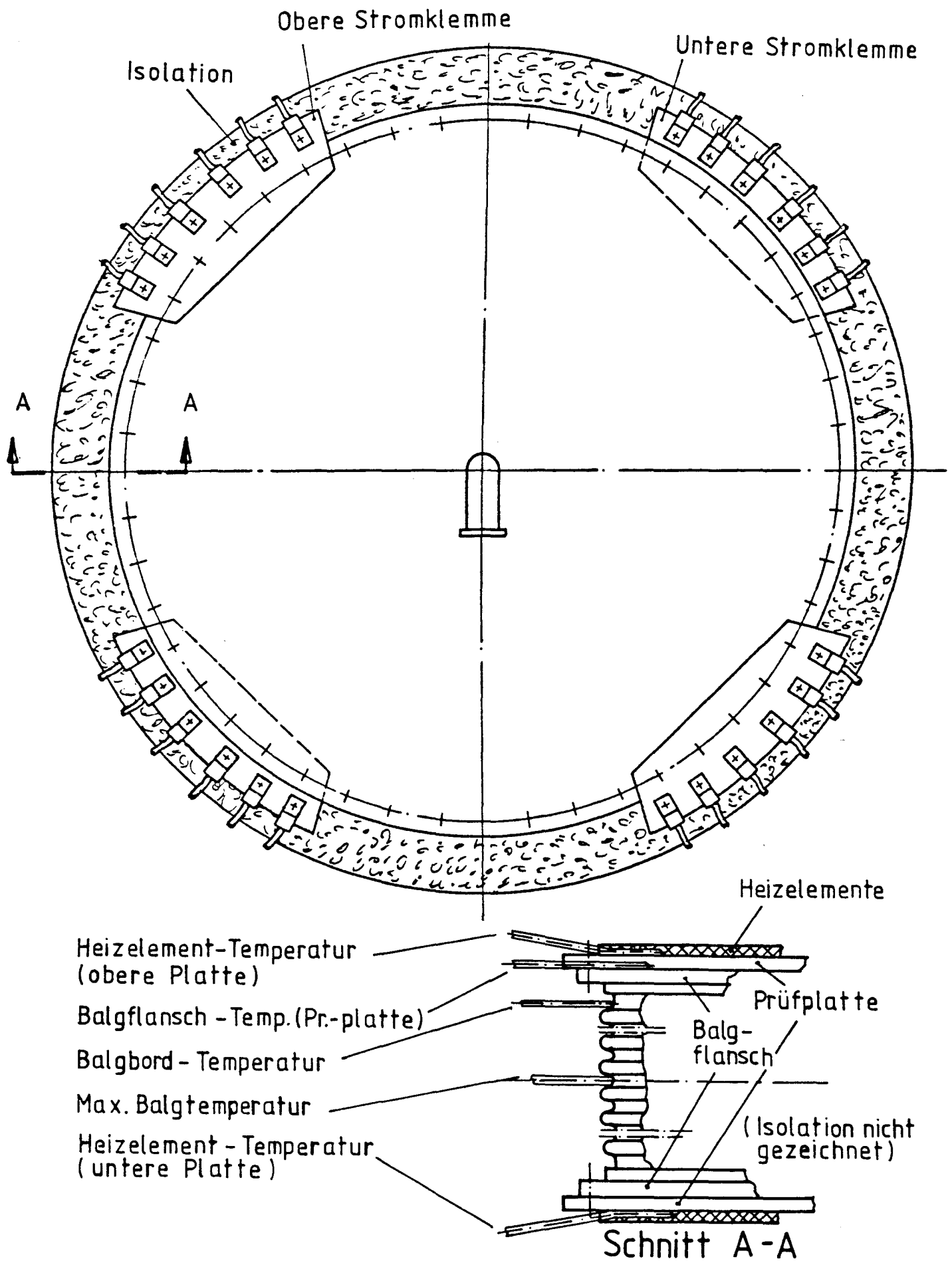
Obere Isolation  
abgedeckt



(Werksphoto Fa. Witzenmann GmbH)

Heiztest - Versuchsaufbau

Fig. 9



Temperaturmessung - Heiztest

Fig.10

